

УДК 621.791.92

**РАСЧЁТ СКОРОСТИ НАПЛАВКИ В УСЛОВИЯХ АДДИТИВНЫХ
КОЛЕБАНИЙ СВАРОЧНОГО ИНСТРУМЕНТА И ВАННЫ**

В.А. Лебедев, доктор технических наук, профессор, главный конструктор ГП «ОКБ ИЭС им. Е.О Патона НАНУ»

С.В. Новиков, ведущий инженер отд. №56 ИЭС им. Е.О Патона НАНУ

Институт электросварки им. Е.О Патона НАНУ

Представлен расчёт скорости наплавки, исходя из условия сплошности в случае гармонического поперечного колебания сварочного инструмента и одновременного продольного колебания сварочной ванны, осуществляемыми относительно оси наплавленного валика по наперёд заданному закону.

Ключевые слова: сплошность, периодическое воздействие, скорость наплавки, гармоническое колебание.

Одной из актуальных задач современной промышленности является повышение прочности сварных конструкций, ремонт и улучшение эксплуатационных характеристик уже готовых изделий, таких как рабочие органы перерабатывающих, почвообрабатывающих и формовых машин: диски, лемехи, лапы культиваторов, ножи измельчителей, скребки, шнеки, ножи режущего аппарата и измельчительные барабаны, траки гусениц, зубья ведущих колес и т.д. Наиболее просто и эффективно осуществление поставленной задачи реализуется посредством применения механических колебаний сварочного инструмента или ванны при формировании структуры наплавляемого валика или сварного шва [1-7]. Оптимальным, с точки зрения формирования структуры, характером колебаний является гармонический [7-8]. Частота колебаний определяется собственной частотой кристаллизации данного типа металла, являющейся в свою очередь функцией скорости сварки / наплавки [3,4,9]. В случае наплавки с применением колебаний немаловажной является проблема сплошности шва, т.е. соблюдения условия формирования сплошного по ширине наплавленного валика. Математически данное условие выражается в записи уравнения определённого положения нормали AB , опущенной из точки A – середины между двумя максимумами функции $y = \frac{L}{2} \sin \omega t$, в произвольную точку графика этой функции, причём длина нормали должна быть равна половине ширины наплавляемого валика – $l/2$ [10] (рис. 1), что описывается системой уравнений [11]:

$$\left\{ \begin{array}{l} a = -\frac{2V_n}{L\omega \cos \omega t} \\ |x_2 - x_1| = \frac{1}{|a|} \left(\frac{L}{2} - \frac{L}{2} \sin \omega t \right) \\ \left(\frac{l}{2} \right)^2 = (x_2 - x_1)^2 + \left(\frac{L}{2} - \frac{L}{2} \sin \omega t \right)^2 \end{array} \right. , \quad (1)$$

где a – угловой коэффициент нормали, ω – частота колебания, L – размах колебания. Модуль обусловлен тем фактом, что расстояние является положительной величиной. Решение системы имеет вид:

$$V_n = \frac{L\omega}{2} \frac{(1 - \sin \omega t) |\cos \omega t|}{\sqrt{\left(\frac{l}{L}\right)^2 - (1 - \sin \omega t)^2}}. \quad (2)$$

Большинство авторов при исследовании влияния внешнего колебания на структуру металла шва ограничиваются одним типом такого колебания, однако, как показано в работе [12], наилучшие результаты в формировании структуры достигаются при сложном движении источника нагрева. Такое движение можно рассматривать как аддитивное влияние поперечных и продольных колебаний. В данной работе делается попытка математически описать данный процесс при условии наплавки на плоскую подложку, где основным будет условие соблюдения сплошности наплавленного валика.

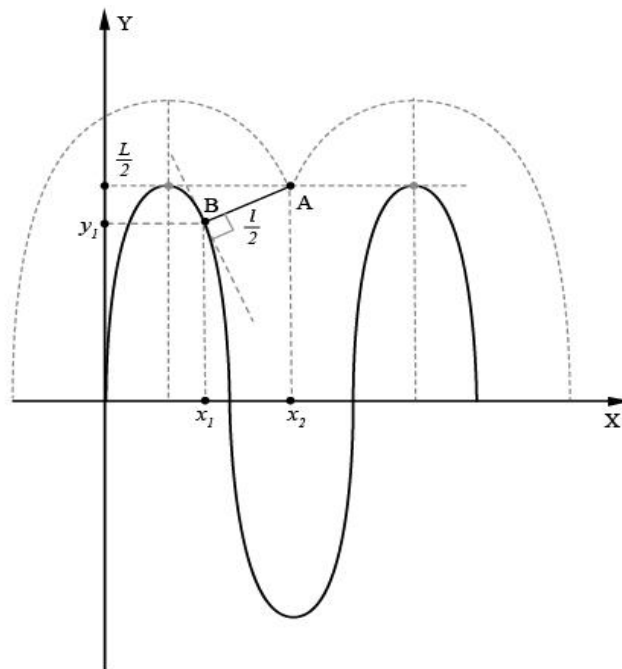


Рис. 1. Схема реализации наплавки с учётом концепции сплошности

Пусть наплавка производится на плоскую деталь, которая колеблется по определённому заданному закону $\psi(t)$, а сварочный инструмент перемещается со скоростью V_n , испытывая продольные гармонические

колебания, описываемые уравнением $y = \frac{L}{2} \sin \omega t$, где ω – частота колебания, L – размах колебания. Тогда точка сопряжения валиков A будет смещаться на некоторый вектор \vec{u} параллельный оси x , а отрезок нормали AB займёт положение $A'B'$ (рис. 2).

Величину смещения т. A можно описать функцией $u(x,t)$, при этом координата x изменится на эту величину и станет равной $x' = x_2 - x_1 + u(x,t)$, тогда система уравнений (1) примет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} a &= -\frac{1}{\frac{\partial y}{\partial x}} = -\frac{1}{\frac{\partial y}{\partial t} \frac{dt}{dx}} = -\frac{1}{\frac{\frac{L\omega}{2} \cos \omega t}{V_n + \frac{\partial u(x,t)}{\partial t}}} = -\frac{2\left(V_n + \frac{\partial u(x,t)}{\partial t}\right)}{L\omega \cos \omega t} \\ |x_2 - x_1 + u(x,t)| &= \frac{1}{|a|} \left(\frac{L}{2} - \frac{L}{2} \sin \omega t \right) \\ \left(\frac{l}{2}\right)^2 &= (x_2 - x_1 + u(x,t))^2 + \left(\frac{L}{2} - \frac{L}{2} \sin \omega t\right)^2 \end{aligned} \right. \quad (3)$$

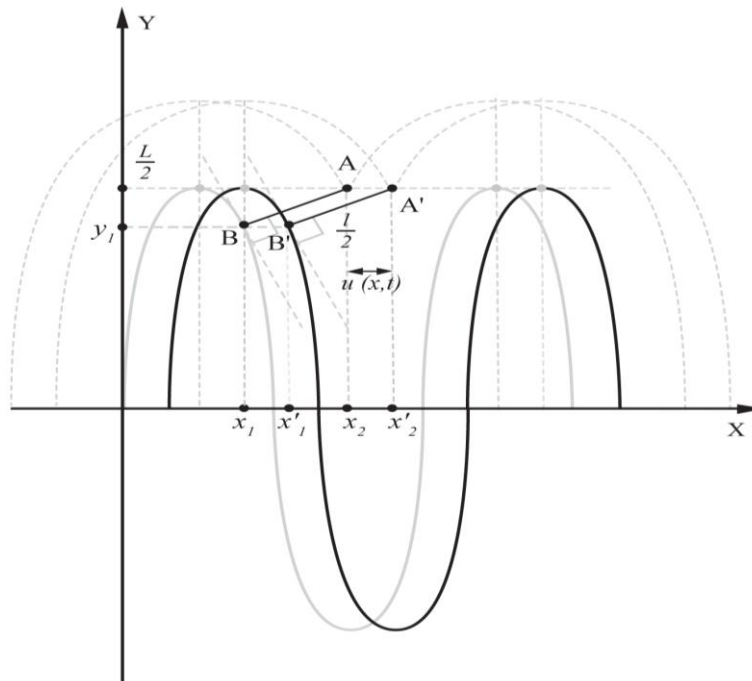


Рис. 2. Изменение положения точки сопряжения валиков при продольных колебаниях сварочной ванны в момент времени t

Функция $u(x,t)$ определяется из дифференциального уравнения гиперболического типа [13]:

$$\left(\frac{\partial \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)}{\partial t} \right) = c^2 \left(\frac{\partial \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)}{\partial x} \right), \quad (4)$$

где $c = \sqrt{\frac{F}{\rho}}$, (F – сила обусловленная вязкостью расплава,

ρ – плотность расплава) - коэффициент учитывающий силу инерции и силу поверхностного натяжения расплава в т.А, который в случае однородного расплава является постоянным. Граничными для данного уравнения будут условиями:

$$u(0,t) = u(K,t) = \psi(t), \quad (5)$$

где K - длина шва.

А начальными:

$$u(x,0) = \psi(0);$$

$$\left(\frac{\partial u(x,t)}{\partial x} \right) \Big|_{t=0} = \left(\frac{\frac{\partial \psi(t)}{\partial t} dt}{\frac{\partial x}{\partial t} dt} \right) \Big|_{t=0} = \left(\frac{\frac{\partial \psi(t)}{\partial t}}{V_n} \right) \Big|_{t=0} = \frac{1}{V_n} \left(\frac{\partial \psi(t)}{\partial t} \right) \Big|_{t=0}. \quad (6)$$

Объединяя выражения (4-6) получим систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{\partial \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)}{\partial t} \right) = c^2 \left(\frac{\partial \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)}{\partial x} \right) \\ u(0,t) = u(K,t) = \psi(t) \\ u(x,0) = \psi(0) \\ \left(\frac{\partial u(x,t)}{\partial x} \right) \Big|_{t=0} = \frac{1}{V_n} \left(\frac{\partial \psi(t)}{\partial t} \right) \Big|_{t=0} \end{array} \right. \quad (7)$$

Решение данной системы будет иметь вид:

$$u(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\psi(0) \cos \frac{\pi n}{K} ct + \frac{K}{\pi n c} \frac{1}{V_n} \left(\left(\frac{\partial \psi(t)}{\partial t} \right) \Big|_{t=0} \right) \sin \frac{\pi n}{K} ct \right) \sin \frac{\pi n}{K} x + \psi(t), \quad (8)$$

где n – любое целое число.

Решением системы (2) относительно V_n будет выражение:

$$V_n = \frac{L\omega}{2} \frac{(1 - \sin \omega t) |\cos \omega t|}{\sqrt{\left(\frac{l}{L}\right)^2 - (1 - \sin \omega t)^2}} - \frac{\partial u(x, t)}{\partial t}. \quad (9)$$

Тогда с учётом формулы (8) окончательная формула будет иметь вид:

$$V_n = \frac{1}{2} \left[\begin{aligned} & \left(\frac{L\omega}{2} \frac{(1 - \sin \omega t) |\cos \omega t|}{\sqrt{\left(\frac{l}{L}\right)^2 - (1 - \sin \omega t)^2}} + \psi(0) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\pi n c}{K} \sin \frac{\pi n}{K} ct \sin \frac{\pi n}{K} x - \frac{\partial \psi(t)}{\partial t} \right) \pm \\ & \sqrt{\left(\frac{L\omega}{2} \frac{(1 - \sin \omega t) |\cos \omega t|}{\sqrt{\left(\frac{l}{L}\right)^2 - (1 - \sin \omega t)^2}} + \psi(0) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\pi n c}{K} \sin \frac{\pi n}{K} ct \sin \frac{\pi n}{K} x - \frac{\partial \psi(t)}{\partial t} \right)^2 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\left(\frac{\partial \psi(t)}{\partial t} \right) \Big|_{t=0} \right) \cos \frac{\pi n}{K} ct \sin \frac{\pi n}{K} x} \end{aligned} \right]. \quad (10)$$

Значения V_n , рассчитанные по формуле (10) для значений $0 < \frac{l}{L} < 2$

должны удовлетворять следующему неравенству [11]:

$$\frac{L\omega}{2} \sqrt{\frac{\frac{l}{L} \sqrt{1 - \left(1 - \frac{l}{L}\right)^2}}{\left| \arcsin\left(1 - \frac{l}{L}\right) \right|}} > V_n > \frac{L\omega}{2} \sqrt{\frac{\frac{l}{L} \sqrt{1 - \left(\frac{l}{L}\right)^2}}{\left| \pi - \arcsin\left(1 - \frac{l}{L}\right) \right|}} \quad (11)$$

Данное условие обусловлено ограничениями на определённое значение V_n , накладываемое знаменателем первого члена формулы (10).

Для значений $\frac{l}{L} \geq 2$ данная формула ограничений не имеет.

Приведен расчёт скорости наплавки с соблюдением условия сплошности формирования наплавочного валика с одновременным периодическим воздействием на расплав сварочной ванны 2-х процессов: поперечного колебания сварочного инструмента и продольного колебания расплава сварочной ванны.

Влияние на формирование структуры металла сварного шва подобных технологических решений аддитивного характера, с учётом соблюдения

условия сплошности ещё не исследовано на практике, что обуславливает необходимость проведения дальнейших экспериментальных исследований.

Литература

1. Макара М.А., Кушниренко Б.Н. Поперечные перемещения дуги как фактор улучшения структуры и свойств сварных швов // Автомат. сварка – №1. – 1967. – с. 31-35.
2. Сутырин Г.В. Исследование механизма воздействия низкочастотной вибрации на кристаллизацию сварочной ванны // Автомат. сварка – №5. – 1975. – с. 7-10.
3. Болдырев А.М. О механизме формирования структуры металла шва при введении низкочастотных колебаний в сварочную ванну // Сварочное пр-во – №2. – 1976. – с. 52-55.
4. Славин Г.А. Формирование дезориентированной структуры металла шва при наложении низкочастотных возмущений на сварную ванну // Сварочное пр-во – №6. – 1980. – с. 3-5.
5. Алов А.А., Виноградов В.С. Повышение качества металла сварных швов // Сварочное пр-во – №7. – 1957. – с. 9-10.
6. Алов А.А., Виноградов В.С. Влияние вибрации электрода на процесс дуговой сварки и свойства швов // Сварочное пр-во – №9. – 1958. – с. 19-22.
7. Аристов С.В., Руссо В.Л. Кристаллизация металла шва при низкочастотных колебаниях расплава // Сварочное пр-во – №11. – 1982. – с. 42-44.
8. Морозов В.П. Анализ условий формирования измельчённой структуры при кристаллизации металла сварочной ванны с наложением внешних периодических возмущений // Известия вузов. Машиностроение. – 2006. – №8. – с. 41-54.

9. Морозов В.П. Влияние колебательного механизма кристаллизации на процесс измельчения первичной структуры металла шва и зоны термического влияния // Наука и образование. – 2010. – №9. – с. 1-18.
10. Данилов А.И. и др. Условие сплошности наплавки при движении источника нагрева по синусоидальному закону // Сварочное производство – №2. – 1980. – с. 26.
11. Лебедев В. А., Новиков С. В. Алгоритм дуговой наплавки цилиндрических деталей со сложным движением сварочного инструмента // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні – №2. – 2015. – с. 119-126.
12. Чен Сяофун, Ши Цзунъяо и др. Особенности кристаллизации металла шва при ЭЛС алюминиевых сплавов со сканированием пучка // Автоматическая сварка. – 1988. – №10.
13. Тихонов А.Н., Самарский А.А Уравнения математической физики. М, «Наука», 1966. – с. 23, 86, 103.

Розрахунок швидкості наплавлення в умовах адитивних коливань зварювального інструменту та ванни. В.О. Лебедев, С.В. Новиков

Наведено розрахунок швидкості наплавлення, що ґрунтується на виконанні критерія суцільності в умовах гармонічного коливання зварювального інструменту, що здійснюється поперек, та одночасного повздовнього коливання зварювальної ванни, які здійснюються відносно вісі наплавляемого валіка за наперед заданим законом.

Calculation of surfacing velocity in condition of additive oscillations of welding tool and pool. V.A. Lebedev, S.V. Novykov

A calculation of velocity of surfacing which is based on to criterion of continuity in presence transverse harmonic oscillation of welding instrument and a simultaneous longitudinal oscillation of welding pool which are carried out longitudinal of axis of surfacing bead and definite by the known law is presented.